

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA PRACTICA
EXPERIMENTAL DE ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA.

ANGELICA FRANCO ARIAS

Proyecto De Grado Presentado Al Tribunal Evaluador Como Requisito De Grado para
optar al Título de Ingeniera En Sistema y Computación

TUTOR:

M.Cs Sebastián Martínez García

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA SISTEMAS
Pereira, 2018

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPITULO UNO: IDEAS PRELIMINARES.....	6
1.1	INTRODUCCION	6
1.2	JUSTIFICACION	6
1.3	ALCANCE.....	7
1.4	OBJETIVOS	7
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	7
2	CAPITULO DOS: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	8
2.1	PROBLEMA DE INVESTIGACION	8
2.2	SITUACION ACTUAL Y ANTECEDENTES.....	8
2.3	EQUIPO EXPERIMENTAL DE LA LEY DE SNELL:	9
2.4	EQUIPO EXPERIMENTAL DE LA LEY DE HOOKE:	10
2.5	EQUIPOS EXISTENTES PARA EXPERIMENTOS ONDULATORIOS.....	11
3	CAPITULO TRES: MARCO TEORICO	14
4	CAPITULO CUATRO: METODOLOGIA Y DESARROLLO	17
4.1	DESARROLLO ELECTRONICO.....	17
4.1.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO	17
4.1.2	PROCESO ELECTRONICO	18
4.1.3	PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PCB (Printed Circuit Board)	23
4.2	PROGRAMACION DEL PROTOTIPO	26
4.2.1	SOFTWARE	26
4.2.2	DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO	28
4.3	DESARROLLO MECANICO	29
4.3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO.....	29
4.3.2	DISEÑO DEL VÁSTAGO EN DONDE SE SUJETA LA CUERDA AL PARLANTE.....	30
4.3.3	PARLANTE DE 15CM 20W 12V CON VÁSTAGO YA PEGADO	31
4.3.4	CAJA PARA GENERADOR DE SEÑALES.....	31
4.3.5	SOPORTE BASE EQUIPO	33
4.3.6	CAJA PARA EL PARLANTE Y AMPLIFICADOR DE SEÑAL.	33
4.3.7	ENSAMBLE PARTE MECANICA.....	34
4.3.8	POLEA CON POCA FRICCIÓN.	34
5	CAPITULO CINCO: RESULTADOS	36
5.1	GENERADOR MECÁNICO DE ONDAS	36

5.2	MASAS	36
5.3	POLEA	37
5.4	GENERADOR DE SEÑALES PARTE FRONTAL	37
5.5	GENERADOR DE SEÑALES PARTE LATERAL.....	37
5.6	PORTE TRASERA DEL GENERADOR DE SEÑALES.....	38
5.7	GALGA	39
5.8	EQUIPO ENSAMBLADO.....	39
5.9	RESULTADOS DE LA PRÁCTICA ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA.	40
5.10	COMPARACIÓN LABORATORIO DE METROLOGÍA DE VARIABLES ELÉCTRICAS.....	48
6	CAPITULO SEIS: CONCLUSIONES	53
7	BIBLIOGRAFÍA	54

TABLA DE CONTENIDO DE IMÁGENES

Figura 1 Diseño del equipo de Ley de Snell [5].....	10
Figura 2 Equipo de la Ley de Hooke [10].....	11
Figura 3 Materiales para experimento cuerda tensa [11]	11
Figura 4 Tecnoedu- impulsor de ondas mecánicas [12]	12
Figura 5 Economy Wave Driver [13]	12
Figura 6 Generador de ondas Pasco [14]	12
Figura 7 Equipo Xplorer GLS [10]	13
Figura 8 Modos de Oscilación de una cuerda Tensa [Propia]	15
Figura 9 Esquema del Circuito. [Propia].....	17
Figura 10 Diseño PCB. [Propia].....	18
Figura 11 Placa teensy. [Propia].....	18
Figura 12 Pantalla Nokia 5110. [Propia].....	19
Figura 13 Amplificador TDA2030A 18 W. [Propia].....	20
Figura 14 Amplificador ensamblado con el chip TDA2050 36W. [Propia].....	20
Figura 15 Encoder Rotativo. [Propia].....	20
Figura 16 Adaptador AC/DC 110VAC 12VDC 2A. [Propia].....	21
Figura 17 Arduino Mini Pro. [Propia].....	21
Figura 18 Celda de carga. [Propia]	22
Figura 19 Conversor Análogo A Digital. [Propia].	22
Figura 20 Disipador Raspberry. [Propia]	23
Figura 21 Pulsador. [Propia].....	23
Figura 22 Fabricación tarjeta electrónica. [Propio]	24
Figura 23 Tarjeta electrónica terminada. [Propia].....	24
Figura 24 Montaje electrónico terminado y funcionando correctamente. [Propia].....	25
Figura 25 Circuito electrónico completo. [Propia]	26
Figura 26 Esquema del dispositivo diseñado de Generador De Onda.....	27
Figura 27 Primer y Segunda Etapa del Software de control del generador de ondas	28
Figura 28 Interfaz de Usuario [Propia].....	29
Figura 29 programa de la Impresa 3D [Propia]	30
Figura 30 Esquema de piezas software DesignSpark Mechanical 2.0. [Propia].....	30
Figura 31 Vástago [Propia].....	31
Figura 32 Parlante con vástago. [Propia]	31
Figura 33 . Diseño caja para generador de señales. [Propia].....	32
Figura 34 Caja para generador de señales. [Propia].....	32
Figura 35 Caja para generador de señales ensamblada. [Propia].....	32
Figura 36 Diseño base equipo. [Propia]	33
Figura 37 Caja para el parlante y amplificador de señal en estado de impresión. [Propia]	33
Figura 38 Caja para el parlante y amplificador de señal en ensamble. [Propia].....	34
Figura 39 Ensamble mecánico. [Propia].....	34
Figura 40 Diseño de polea lateral. [Propia].....	35

Figura 41 Diseño de polea frontal. [Propia].....	35
Figura 42 Polea Impresa. [Propia].....	35
Figura 43 Generador mecánico de ondas ensamblado. [Propia]	36
Figura 44 Masas. [Propia].....	36
Figura 45 Polea. [Propia]	37
Figura 46 Generador de señales parte frontal. [Propia].....	37
Figura 47 Generador de señales parte lateral. [Propia]	38
Figura 48 Parte trasera generador de señales. [Propia].....	38
Figura 49 Galga. [Propia].....	39
Figura 50 Equipo ensamblado. [Propia]	40
Figura 51 Frecuencia en función del número de armónicos[Propio].....	41
Figura 52 Frecuencia en función de la raíz cuadrada de la tensión.[propia]	44
Figura 53 Frecuencia en función del inverso de la longitud[propia]	45
Figura 54 Comparación tablas de datos con longitud y tensión constante[Propia].	46
Figura 55 Comparación de graficas de los equipos de laboratorio con el equipo de Dicoped[Propia].	47
Figura 56 Comparación de Resultados de los equipos bajo Prueba[Propia].	47
Figura 57 Primera Parte del Certificado de Calibración[propia].....	49
Figura 58 Segunda Parte del Certificado de Calibración[Propia]	50
Figura 59 Tercera Parte del Certificado de Calibración[propia].....	51
Figura 60 Efecto del estroboscopio sobre la cuerda tensa vibrando[Propio].	51
Figura 61 Estroboscopio diseñado e implementado [Propio].....	52

1 CAPITULO UNO: IDEAS PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCION

El estudio de la física es fundamental para todas las áreas del conocimiento científico, desde ingenierías hasta las matemáticas puras, teniendo como prioridad la asimilación del conocimiento sobre los conceptos básicos que permitan iniciar estudios más fuertes posteriormente, y de mayor envergadura y aplicabilidad al mundo real.

Partiendo de los conceptos físicos adquiridos en un aula de clase, muchos de los fenómenos y sucesos de nuestra vida cotidiana tienen una explicación. Sin embargo, para poder interiorizar un concepto es necesario crear practicas experimentales o vivenciales que muestren de una manera más clara un fenómeno físico.

El estudio y análisis del movimiento de una onda estacionaria es de gran importancia para la física, las practicas experimentales en las instituciones y universidades, buscan demostrar y aplicar los diferentes comportamientos de la naturaleza, de este modo lograr observar y comprender cuales son los cambios que se genera, por ejemplo, en una onda sometida a diferentes medios, mostrando la importancia estudiar los cambios en la frecuencia, la amplitud, la tensión y la longitud. Es así como una onda en movimiento que presenta una propagación a través de un medio (cuerda, agua, aire) produce, a su vez, uno o más armónicos o nodos de oscilación.

El presente trabajo propone, con la creación de un prototipo para la experimentación del fenómeno de ondas en una cuerda, que los estudiantes y docentes evidencien los conceptos básicos sobre una onda estacionaria aplicados en una cuerda tensa, y de este modo consolidar un conocimiento partiendo de la práctica experimental mientras se cumple con características de fácil manejo y portabilidad.

1.2 JUSTIFICACION

Debido a la necesidad que se presenta actualmente en los laboratorios de física de la universidad, de contar con la tecnología necesaria para realizar las practicas, mejorar las metodologías y simplificar los procesos que se realizan de manera manual. Se llevó a cabo el diseño y construcción de un prototipo para la práctica experimental de ondas estacionarias en una cuerda tensa, con el fin de implementar dichas mejoras de una manera sencilla y buscando aplicar e integrar cada uno de los conocimientos adquiridos en programación y electrónica para optimizar, incrementar la calidad de aprendizaje de la práctica, recortar el tiempo de su ejecución y adaptarlo a métodos más actuales y acordes a los cambios actuales.

Así mismo, para los estudiantes, la física siempre ha sido un obstáculo en gran parte de su carrera, sin embargo, el proyecto busca motivar y mostrar todo lo que se puede aportar tanto a la física como a la didáctica, mostrando de una forma más sencilla los fenómenos físicos.

El prototipo que se construyó cuenta con una parte mecánica robusta, que resista el uso cotidiano en un laboratorio, y que permitan el buen funcionamiento de cada objeto necesario para la práctica. Se tuvo en cuenta el diseño de un circuito electrónico y la implementación de una interfaz o pantalla que facilite la manipulación del operario o estudiante con el

equipo, además manejar un lenguaje claro y sencillo donde el estudiante puede comprender rápido el funcionamiento del prototipo.

1.3 ALCANCE

El prototipo es en su mayoría independiente, no necesitó ningún objeto o artículo externo para su manipulación. En la parte física tendrá dos barras para sostener una cuerda, una polea en una de las barras, generador de frecuencia, pantalla para la manipulación de datos, generador de ondas, y sensores necesarios para medir atributos físicos. En lo que conlleva la electrónica se necesitó objetos de Arduino y el software tiene toda la información acerca de la fabricación del prototipo, tales como materiales usados, diseñadores, etc. También cuenta con un menú para la interactividad con el usuario; desde allí se maneja toda la parte electrónica del prototipo (cambiar variables), cálculo de las operaciones del experimento, y resultados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un prototipo para la práctica experimental de ondas estacionarias en una cuerda tensa.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar e implementar un software que sea interactivo para el usuario, que permita el manejo del prototipo y que realice los cálculos pertinentes a la práctica.
- Diseñar e implementar un sistema mecánico óptimo que integre todos los elementos del prototipo
- Diseñar un sistema electrónico que se adapte al prototipo planteado.
- Elaborar un manual de usuario que facilite el manejo del prototipo.
- Diseñar una guía para la práctica experimental de ondas estacionarias en una cuerda tensa.

2 CAPITULO DOS: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

2.1 PROBLEMA DE INVESTIGACION

El diseño y construcción de un prototipo para la práctica experimental de ondas estacionarias en una cuerda tensa, nace de la necesidad de mejorar los mecanismos como se realiza la práctica en un laboratorio, de igual forma se busca tener un equipo que pueda representar la practica en cualquier aula y que no sea necesario la adecuación de espacios donde el equipo se encuentre montado.

Una de las mayores motivaciones es agregar el uso de tecnología que se hace tan necesaria para optimizar los tiempos y obtener datos con mayor confiabilidad.

Teniendo en cuenta que el laboratorio de física 3 de la universidad tecnológica de Pereira solo cuenta con un montaje para la práctica experimental de ondas estacionarias en una cuerda tensa, se mueve la necesidad de integrar la mecánica, electrónica y programación para diseñar y construir un prototipo que cuente con las herramientas necesarias para cumplir con el movimiento descrito.

2.2 SITUACION ACTUAL Y ANTECEDENTES

El presente trabajo realza la importancia de la experimentación como una herramienta que permite la asimilación de los conceptos básicos de la física para alumnos y docentes, como es el caso de las ondas en una cuerda tensa. Igualmente, los avances tecnológicos surgen a partir de la interiorización de estos conceptos y su puesta en práctica como solución a los problemas del mundo.

Por otra parte, las nuevas tecnologías y todo el avance en investigación, se llega a la necesidad de encontrar nuevos mecanismos que ayuden a crear una forma más clara y sencilla de transmitir el conocimiento y a su vez compartir experiencias que nos lleve a construir mejores contenidos de las asignaturas, por esto nos centramos en el estudio del funcionamiento mecánico y electrónico de la cuerda tensa para poder encontrar las oportunidades que brinda el diseño y construcción de prototipos que fomenten el aprendizaje de leyes físicas y la aplicabilidad de los contenidos en un aula de clase.

En este contexto, el trabajo de D. Gómez en su trabajo “Sobre los cuasi-nodos en las oscilaciones de cuerdas reales” [1], advierte la importancia del uso de un equipo de cuerda tensa para el estudio de los cuasi-nodos presentados en las oscilaciones forzadas. Contempla dentro de sus conclusiones, la importancia de la experimentación como una herramienta clave para el aprendizaje de fenómenos físicos. Así mismo, concluye que la experiencia le permitió introducir el concepto de amplitud de respuesta, o curva de resonancia del sistema, que relaciona la entrada (fuerza impulsora) y la salida (amplitud de las oscilaciones de un dado punto de la cuerda) en función de la frecuencia.

Por otra parte, el trabajo de A. Roatta, en su trabajo “Efecto Doppler para pulsos y su representación en el plano (x, t) ” [2] utiliza el esquema teórico de ondas en una cuerda tensa para analizar el efecto Doppler, debido a que siempre se le ha atribuido este efecto único de las ondas armónicas, demostrando que el efecto está vinculado con las compresiones y expansiones en el dominio del espacio y el tiempo, de cualquier tipo de pulso. Concluyó la importancia del estudio previo de ondas mecánicas que se propagan a través de una cuerda tensa, antes de introducir el concepto de efecto Doppler.

Igualmente, R. Alvarado et al en su trabajo “Modos de oscilación en cuerdas con densidad constante por mitades: análisis y demostración experimental” [3] estudia algunas soluciones propias de una cuerda, caracterizada por una densidad de masa constante en sus mitades (homogénea por mitades), sujeta por sus dos extremos y sometida a tensión constante, lo que resulta análogo al del planteamiento de la ecuación de Schrödinger para potenciales constantes por tramos, de modo que la solución buscada admite el uso de métodos de acoplamiento de soluciones, usuales en mecánica cuántica introductoria. De esta forma, concluyen que el uso de demostraciones experimentales como el de la onda tensa unido con el método propuesto es una forma amena de aplicar conocimientos que requerirán en cursos posteriores (mecánica cuántica) a cursos fundamentales como el de mecánica de ondas.

Por último, B.J. Gómez et al en su trabajo “Efectos de la inserción de elementos de parámetros concentrados sobre los modos normales de oscilación de un medio finito continuo” [4] realza la importancia del estudio de la influencia de parámetros concentrados sobre los modos normales de oscilación de un medio continuo de dimensiones finitas, además realiza una analogía entre el comportamiento de estos parámetros en los fenómenos ondulatorios de una cuerda cargada con una masa puntual, una antena dipolo cargada con una inductancia concentrada y un tubo con una cámara de expansión mostrando muestra que las ecuaciones que determinan las frecuencias propias de estos tres sistemas son prácticamente idénticas entre sí.

Se presentan algunos referentes de diferentes equipos que comprueban leyes físicas, entre ellos tenemos el Equipo experimental de la ley de Snell y Ley de Hooke, los cuales se describen a continuación, importantes para el presente trabajo por estar contenidos dentro del inventario del grupo de investigación DICOPED: [5]

2.3 EQUIPO EXPERIMENTAL DE LA LEY DE SELL:

Es un prototipo electrónico que tiene como función mostrar experimentalmente que sucede con un rayo cuando traspasa un medio, en este caso se quiere probar la ley de Snell, para ello se diseña y se construye un equipo que posee todos los elementos necesarios para trabajar la óptica geométrica y demuestra experimentalmente el comportamiento de un haz de luz en un medio.

Del mismo modo se tiene un experimento donde se observa el comportamiento de un rayo incidente y un rayo reflejado al pasar por un medio como el acrílico o el agua.

Con el fin de encontrar respuestas a el comportamiento de un haz de luz en el momento de pasar por diferentes elementos, el grupo de investigación DICOPED diseña y construye un equipo autónomo llamado ley de Snell, el cual demuestra de una forma didáctica la interacción entre un rayo de luz y el acrílico teniendo en cuenta el cambio del medio, el ángulo incidente y refractado.

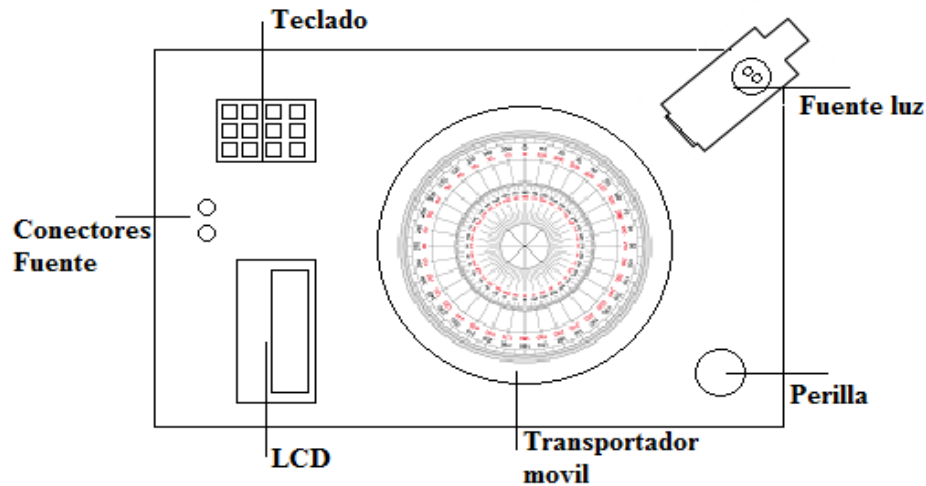


FIGURA 1 DISEÑO DEL EQUIPO DE LEY DE SNELL [5]

2.4 EQUIPO EXPERIMENTAL DE LA LEY DE HOOKE:

Uno de los elementos mecánicos que puede almacenar energía es el resorte, este elemento almacena energía dependiendo de su compresión o elongación, un ejemplo claro de ello lo constituye el sistema masa-resorte.

En términos generales, el sentido de diseñar y construir un prototipo autónomo para la práctica experimental de la ley de Hooke radica en que, actualmente, existen gran cantidad de falencias instrumentales en el contexto de las prácticas de laboratorio de física en la academia.

El equipo desarrollado está conformado por un circuito electrónico microcontrolador, un sensor de distancia y un sistema mecánico masa-resorte, que permite determinar la elongación del resorte en función de la masa y a partir de ellas calcular la constante del mismo.

El aprendizaje comprende diferentes formas y métodos, basándose en la interpretación absoluta y significativa de una temática en particular, por ello el propósito del proyecto se direcciona al ámbito escolar como a nivel de educación superior; con el fin de afianzar los conocimientos adquiridos. Todos los participantes de este proceso de aprendizaje (docentes, estudiantes, directivos, etc.) de alguna u otra manera están en la búsqueda de mejoras para la construcción y difusión del conocimiento, aplicando estrategias didácticas que fomenten la generación de espacios idóneos para la interacción entre los sujetos involucrados.



FIGURA 2 EQUIPO DE LA LEY DE HOOKE [10]

2.5 EQUIPOS EXISTENTES PARA EXPERIMENTOS ONDULATORIOS

Las practicas realizadas en las diferentes instituciones educativas en lo concerniente a las practicas relacionadas con el movimiento ondulatorio, se pudo evidenciar el uso de herramientas de un elevado valor económico, dado que no se cuenta con herramientas en el medio que permitan de forma fácil y económica generar ondas mecánicas para el estudio de los fenómenos en cuestión.

Dentro de los experimentos observados, se pueden encontrar algunas posibilidades como la implementación de un timbre para la excitación puntual de la cuerda tensada en ambos extremos.



FIGURA 3 MATERIALES PARA EXPERIMENTO CUERDA TENSA [11]

Así mismo, se encontraron dispositivos que se encargan de dicha labor, entre ellos se pueden enumerar.

1. Tecnoedu- impulsor de ondas mecánicas.



FIGURA 4 TECNOEDU- IMPULSOR DE ONDAS MECÁNICAS [12]

Este generador de ondas mecánicas de marca Pasco es utilizado en el laboratorio de física 3 donde los estudiantes lo conectan a un generador de señales para su funcionamiento.

2. Economy Wave Driver



FIGURA 5 ECONOMY WAVE DRIVER [13]



FIGURA 6 GENERADOR DE ONDAS PASCO [14]

Finalmente se observó el desarrollo de la práctica en el laboratorio de física 3 de la UTP, donde se pudo apreciar que se utiliza un equipo de la marca Xplorer que se muestra en la siguiente figura:



FIGURA 7 EQUIPO XPLOER GLS [10]

De lo anterior se puede evidenciar que la mayor dificultad de desarrollo del prototipo se basa en la construcción del generador de ondas mecánicas, dado que es una herramienta muy costosa y de la cual se encuentra poca información en la bibliografía.

De igual forma tanto el generador de ondas mecánicas como el generador de frecuencias son equipos que en el mercado tienen un alto costo y a su vez los problemas que surgen cuando uno de estos equipos falla son muchos como por ejemplo encontrar un generador con una buena resolución y que se encuentren los mejores armónicos posibles.

3 CAPITULO TRES: MARCO TEORICO

En el marco del presente proyecto, es importante reconocer los conceptos básicos conectados con las ondas en una cuerda tensa, electrónica y programación, por esto se plantea una breve descripción de los conceptos que fueron considerados como los más importantes, expresados a continuación.

Onda: es un movimiento o alteración que se produce y se propaga a través de los diferentes medios donde se pueda generar, como el agua, aire, cuerda, entre otras; dichas ondas se clasifican según el medio donde se produce las cuales se pueden distinguir como ondas mecánicas y ondas electromagnéticas. A demás existen diferentes formas de ondas, onda senoidal, onda cuadrada, entre otras. [6]

En la onda no hay nada material que se esté propagando, se trata del movimiento coordinado de muchos elementos como por ejemplo cuando se acoplan muelles unos con otros, cuando varias capas de aire se mueven unas a otras, también sucede cuando un campo eléctrico induce uno magnético y viceversa. Se debe tener en cuenta que el punto de una onda cambia en cada lugar del espacio y del tiempo de esta forma se crea una ecuación matemática que cumpla con esas condiciones. [6]

Onda Mecánica: se conoce como onda mecánica a la perturbación que viaja a través de un medio elástico, transportando energía. Se consideran dos tipos de ondas, ondas transversales donde las partículas que conforman el medio se mueven perpendicular a la dirección de la propagación, y ondas longitudinales donde las partículas que conforman el medio se mueven en un va y viene en la misma dirección de la propagación. [7]

Una onda trasversal es periódica, es decir, que tenemos un movimiento armónico simple donde su ecuación la función general de la onda se puede describir de la siguiente manera:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx \pm \omega t + \phi) \quad (1)$$

Donde

A: amplitud de la onda

K: el número de veces que se encuentra la onda de 0 a 2π dado por la ecuación

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

ω : frecuencia angular dada por la formula

$$\omega = k \cdot v = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que en una onda están presentes la longitud λ , la frecuencia f y la velocidad v , se puede apreciar una relación entre ellas de la siguiente manera:

$$\lambda = v / f \quad (4)$$

$$f = v / \lambda \quad (5)$$

$$v = \lambda \cdot f \quad (6)$$

Si se considera una cuerda de longitud L y densidad de masa μ sujeta por sus extremos donde su posición inicial es $X = 0$ y Su posición Final es $X = L$, la cuerda se le integra una alteración llamada vibración por medio de un generador mecánico, conectado a un generador de ondas sinodales, las cuales al ir variando su frecuencia mostrara una serie de vientres

o armónicos donde dos señales se superponen, mostrando así los nodos y puntos máximos de oscilación. [8]

Cuando la cuerda perturbada entra en resonancia con el generador mecánico que produce el movimiento, se presentan los distintos modos propios de oscilación y los desplazamientos transversales tendrán su máxima amplitud. Para encontrar las frecuencias f_n que corresponden a cada modo propio de oscilación se deben tener en cuenta las siguientes condiciones de frontera. [9]

$$\begin{aligned} y(0, t) &= 0 \\ y(L, t) &= 0 \end{aligned}$$

Si tenemos que $KL = n\pi$ con $n = 1, 2, 3 \dots$ y consideramos las ecuaciones (2) y (6) obtenemos la ecuación de las frecuencias correspondientes a los modos propios de oscilación de la cuerda.

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (7)$$

De las ondas transversales en una cuerda podemos tener que la velocidad de propagación a lo largo de la cuerda es:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (8)$$

Siendo T la tensión de la cuerda, la expresión para las frecuencias de los modos de vibración quedaran definidas por:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (9)$$

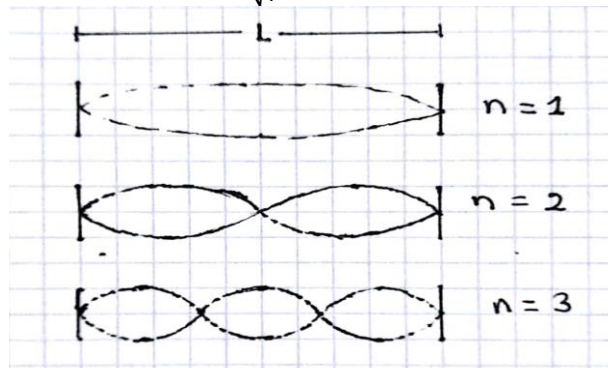


FIGURA 8 MODOS DE OSCILACIÓN DE UNA CUERDA TENSA [PROPIA]

Onda estacionaria: se conoce como estacionaria a la presencia de puntos que son inmóviles los cuales son llamados nodos, consiste en una onda que viaja ya puede ser a través de una cuerda tensa, tubo de aire, entre otros, donde interfieren dos ondas con la misma amplitud y frecuencia, pero en sentido contrario [9].

Frecuencia: término asignado cuando un suceso se repite bajo las mismas condiciones en un periodo determinado de tiempo. La unidad de medida para la frecuencia es en Hertz (Hz) y respectiva formula es [7]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

f = frecuencia

T = periodo

Ciclo: suceso que se repite en cierto periodo de tiempo, son fenómenos periódicos que siempre vuelven a su configuración inicial. [9]

Amplitud: es una medida que está presente en una onda debido a su oscilación, y de acuerdo con esta oscilación se genera una variación a lo largo de la onda y la amplitud me ayuda a determinar dicha variación. [9]

Longitud: teniendo en cuenta que en una onda se puede formar una función seno o una función coseno, en las cuales se generan picos y la distancia que hay entre pico y pico se le denomina longitud de onda. [9]

Periodo: es el tiempo que transcurre a lo largo de un fenómeno hasta que este nuevamente se repite. [9]

Velocidad: es el ritmo con el cual la onda viaja. Esta velocidad está dada por [9]:

$$V = \frac{\lambda}{T} = f \cdot \lambda$$

Oscilación: es el movimiento de un lado a otro partiendo de su punto o eje central que se presenta cuando ocurre una perturbación o variación de un sistema. [9]

Nodos: son los puntos inmóviles a lo largo de la onda estacionaria [9].

Antinodos: en una cuerda tensa se puede producir un antinodo o también llamados vientres, los cuales al ir variando la frecuencia de oscilación producen puntos donde tienen una máxima amplitud [9].

Armónicos: los armónicos de una cuerda tensa son cuando se generan frecuencias de resonancia donde las dos ondas que se encuentran están vibrando a la misma frecuencia, pero en sentido contrario. [9]

4 CAPITULO CUATRO: METODOLOGIA Y DESARROLLO

Dada las necesidades del prototipo en cuanto a las variables físicas que se deben manipular (frecuencia, amplitud, periodo, masas, tensiones), se optó por dividir el diseño y construcción en dos (2) partes significativas. Por un lado, el diseño y construcción de un generador de ondas mecánicas conectado a un generador de señales para el control de la frecuencia, amplitud de oscilación, y por el otro la implementación y acondicionamiento de un sensor que permita realizar la medición de la tensión presente en la cuerda en tiempo real.

Así mismo se definió el uso de dos barras de acero inoxidable para las estructuras principales del prototipo, y el diseño e impresión en 3D de las piezas que requieran de un mayor detalle para su funcionalidad.

4.1 DESARROLLO ELECTRONICO

4.1.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

El diseño electrónico del prototipo se basa en una placa de desarrollo Teensy 3.2 y una tarjeta micro controlada Arduino, con el fin de controlar cada uno de los periféricos (Celda de carga, parlante o timbre para la amplificación de los pulsos).

Para el desarrollo electrónico se diseñó el esquemático del circuito que nos describe cada uno de los componentes y sus puntos de conexión de una forma sencilla e intuitiva de comprender.

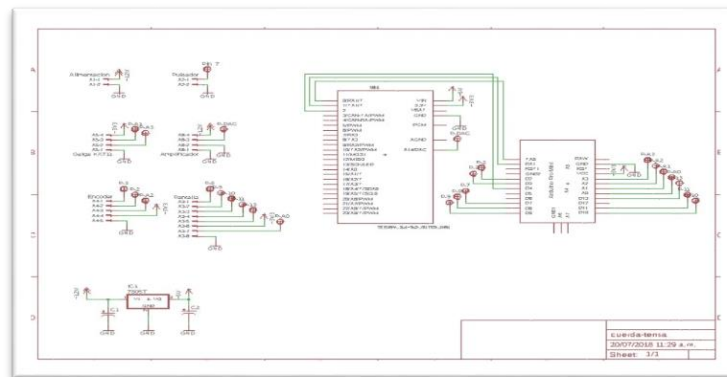


FIGURA 9 ESQUEMA DEL CIRCUITO. [PROPIA]

Del mismo modo, se realizó el diseño del PCB culminado en el software de desarrollo de tarjetas impresas con sus respectivas conexiones lista para el proceso de fabricación.

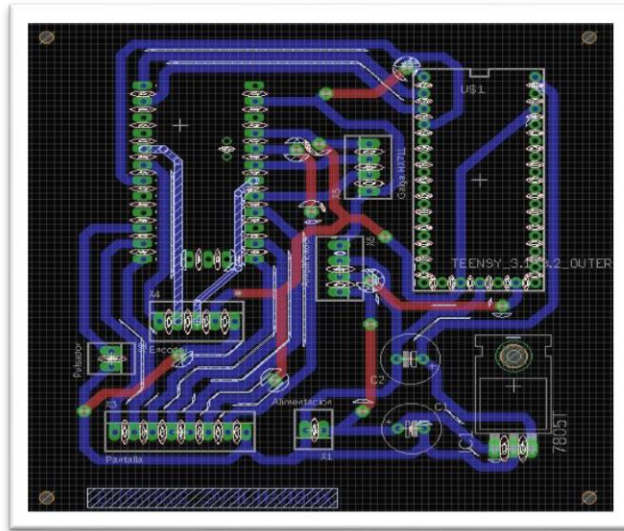


FIGURA 10 DISEÑO PCB. [PROPIA]

4.1.2 PROCESO ELECTRONICO

Para el desarrollo del proyecto es necesario dar claridad de los elementos a utilizar para la creación del generador de ondas mecánicas y el generador de señales, del mismo modo es necesario mostrar el ensamble mecánico del equipo.

4.1.2.1 PLACA DE DESARROLLO TEENSY 3.2



FIGURA 11 PLACA TEENSY. [PROPIA]

La placa Teensy es un Sistema completo de Desarrollo de microcontroladores de 32 bits con puerto USB de forma nativa, convirtiendo a estas placas en un sistema de espacio muy pequeño. Estas placas cuentan con alto rendimiento, gran memoria, recursos abundantes. En el caso de la cuerda tensa, la placa que se implemento fue la **Teensy 3.2**. que cuenta con las siguientes especificaciones:

- Procesador: 32-bit ARM Cortex-M4 96 MHz CPU (MK20DX256VLH7)
- Memoria: 256K, 64K RAM, 2K EEPROM
- 14 pines analógicos de alta resolución (13 bits usables y 16 bit en hardware)
- 34 pines digitales I/O (10 son compartidos con los analógicos)
- DMA de 16 canales
- 12 salidas PWM
- 7 temporizadores (Timers)
- DMA dedicado para USB
- 3 puertos UARTs (serie)
- Protocolos soportados: SPI, I2C, I2S, modulador IR
- I2S (para interfaz de audio de alta calidad)
- Soporta RTC añadiendo un cristal de 32.768 KHz y batería externa
- 4 canales DMA para uso general (separados del USB)
- Dimensiones: 35x18 mm
- Entradas táctiles

4.1.2.2 PANTALLA NOKIA 5110



FIGURA 12 PANTALLA NOKIA 5110. [PROPIA]

Esta pequeña pantalla de 84 x 48 pixeles encontraremos una alternativa muy económica y práctica para mostrar información de cualquier tipo de proyecto que se esté realizando.

Las ventajas de esta pequeña pantalla son: Graficar imágenes, funciones, texto, figuras, etc.

Fácil de programar (su programación es muy similar a la lcd 16x2 que es un clásico en el mundo de la programación de microcontroladores), muy económica para la gran cantidad de prestaciones que nos ofrece esta pequeña pantalla

4.1.2.3 AMPLIFICADOR DE AUDIO TDA2030A 18W

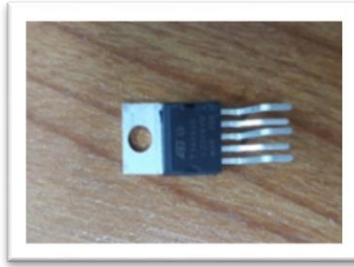


FIGURA 13 AMPLIFICADOR TDA2030A 18 W. [PROPIA]

Esta placa se le reemplazo el chip por el TDA2050 36w debido a que la amplitud que generaba el otro era insuficiente para poder observar el fenómeno de la cuerda vibrando

Este amplificador es un simple chip que es capaz de aumentar la ganancia de reproductores de audio para manejar parlantes de mediana potencia con muy baja distorsión en el sonido y poca perdida de potencia en calor.

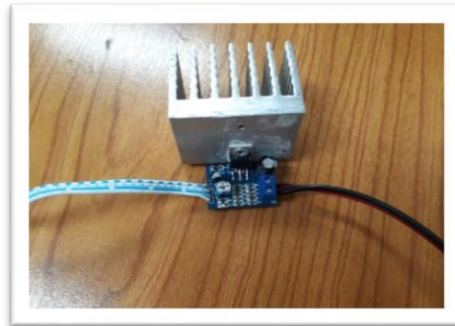


FIGURA 14 AMPLIFICADOR ENSAMBLADO CON EL CHIP TDA2050 36W. [PROPIA]

4.1.2.4 ENCODER ROTATIVO



FIGURA 15 ENCODER ROTATIVO. [PROPIA]

El encoder es un dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos: digitales binarias, analógicos en función de una onda, pulsos, etcétera. De este modo, un encoder es una interfaz entre un dispositivo mecánico móvil y un controlador.

En este proyecto se implementó un encoder incremental, el cual genera pulsos que codifican la rotación, ya sea en ciclo horario o anti-horario, con 20 pulsos por ciclo. A diferencia de un potenciómetro, este encoder no posee topes mecánicos, por lo que puede girar libremente. El encoder puede ser pulsado, de modo que se puede usar para seleccionar algo.

Es muy útil para proyectos de audio, HMI, búsqueda y selección de archivos.

4.1.2.5 DAPTADOR AC/DC 110VAC 12VDC 2A



FIGURA 16 ADAPTADOR AC/DC 110VAC 12VDC 2A. [PROPIA]

Este adaptador toma los 120v AC de la red de energía local y los convierte en 12v DC a 2A para alimentar todo el sistema

4.1.2.6 ARDUINO MINI PRO MEGA328 5V 16MHZ

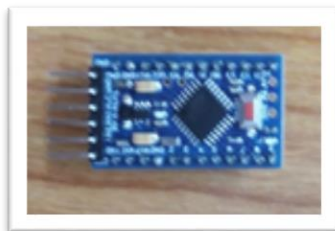


FIGURA 17 ARDUINO MINI PRO. [PROPIA]

Esta pequeña placa de desarrollo cuenta con las mismas prestaciones del Arduino UNO, pero con la excepción que no cuenta con puerto USB, esta placa básicamente consta con los componentes necesarios para que el microcontrolador funcione de forma ideal, para poder programar esta pequeña placa es necesario un conversor USB a serial ttl [16].

Esta placa cuenta con las siguientes prestaciones:

- Chip ATmega328 a 16MHz con cristal de cuarzo externo (tolerancia: 0.5%)
- Auto-reset

- Regulador 5V integrado
- Max: 150mA por salida
- Protección de sobrecarga
- Protección contra inversión de polaridad
- Entrada DC de 5V hasta 12V
- LED de power y estado

4.1.2.7 CELDA DE CARGA 5 KG, SENSOR DE PESO, GALGA



FIGURA 18 CELDA DE CARGA. [PROPIA]

Una celda de carga es un transductor utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión empieza a partir de un dispositivo mecánico, es decir, la fuerza que se desea medir deforma la galga extensiométrica. Y por medio de medidores de deformación (galgas) obtenemos una señal eléctrica con la cual podemos obtener el valor de la fuerza que deseamos medir.

4.1.2.8 MODULO CONVERSOR ANALOGO A DIGITAL HX711



FIGURA 19 CONVERSOR ANALOGO A DIGITAL. [PROPIA].

Este módulo es una interfaz entre las celdas de carga y el microcontrolador, permitiendo poder leer el peso de manera sencilla. Internamente se encarga de la lectura del puente wheatstone formado por la celda de carga, convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits. Es muy utilizado en procesos industriales, sistemas de medición automatizada e industria médica, se comunica con el microcontrolador mediante 2 pines (Clock y Data) de forma serial.

4.1.2.9 DISIPADOR RASPBERRY PI X3



FIGURA 20 DISIPADOR RASPBERRY. [PROPIA]

Es un pequeño disipador que cumple la función de refrigerar el microcontrolador de la placa Teensy 3.2 por el motivo de que se está trabajando con el microcontrolador en un rango superior de ciclo de reloj.

4.1.2.10 PULSADOR NORMALMENTE ABIERTO PARA CHASIS



FIGURA 21 PULSADOR. [PROPIA].

Un pulsador es un dispositivo mecánico que al ser accionado cierra un circuito permitiendo el flujo de la corriente hasta que lo soltemos o hasta que lo oprimimos, es decir existen pulsadores normalmente abiertos que son los que dan el paso de corriente cuando son accionados o normalmente cerrados que siempre permiten el paso de la corriente hasta que son accionados

4.1.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PCB (Printed Circuit Board)

El PCB se fabricó en una ruteadora CNC de muy alta resolución con el fin de lograr el mejor acabado posible sin ningún error en las pistas del circuito.



FIGURA 22 FABRICACIÓN TARJETA ELECTRÓNICA. [PROPIO]

4.1.3.1 PCB culminado por ambos lados

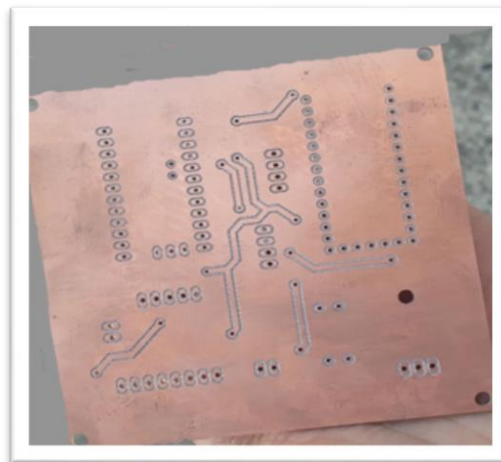
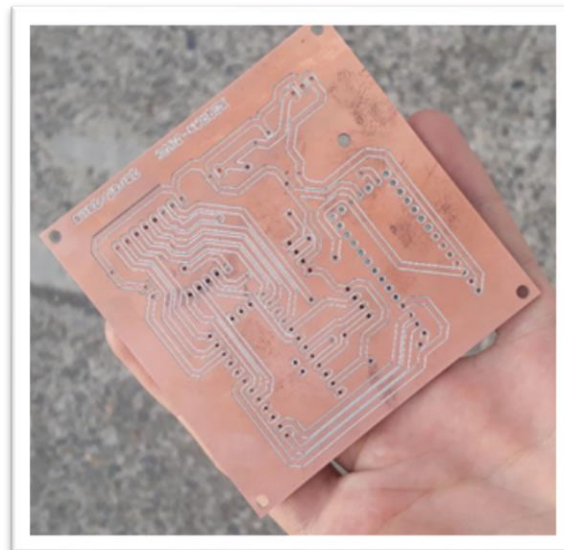


FIGURA 23 TARJETA ELECTRÓNICA TERMINADA. [PROPIO]

En la figura 23 se observa la tarjeta terminada, imagen superior se encuentra la cara posterior y en la parte inferior de la imagen se encuentra la cara anterior de la tarjeta electrónica.

4.1.3.2 PCB fabricada en ruteadora CNC y con los componentes extras ya soldados

Un PCB o **Printed** Circuit Board, es la superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente por medio de la base un conjunto de componentes electrónicos. Las pistas son generalmente de cobre mientras que la base se fabrica de resinas de fibra de vidrio reforzada, pertinax, cerámica, plástico, teflón o polímeros como la váquela.

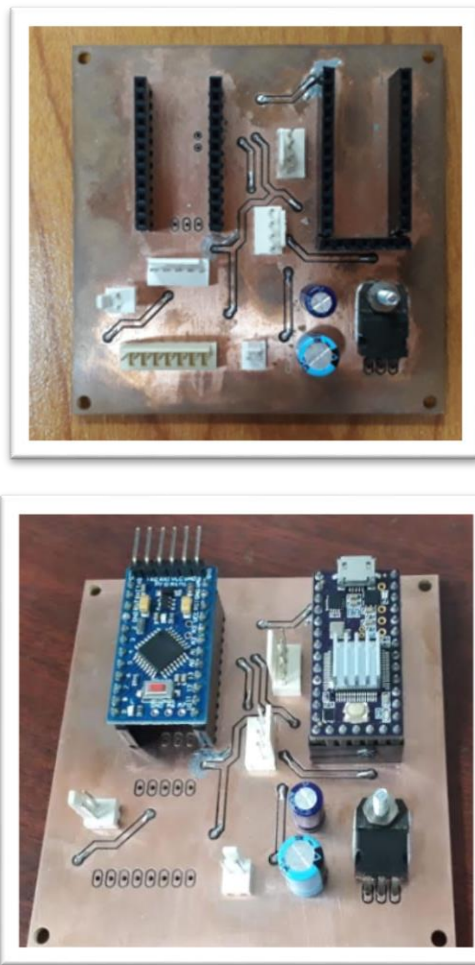


FIGURA 24 MONTAJE ELECTRÓNICO TERMINADO Y FUNCIONANDO CORRECTAMENTE. [PROPIA]

En la figura 24 se observa todos los elementos montados en la placa impresa previamente, en la parte superior de la imagen se observa la cara anterior de la placa y en la parte inferior de la imagen se observa la cara posterior.

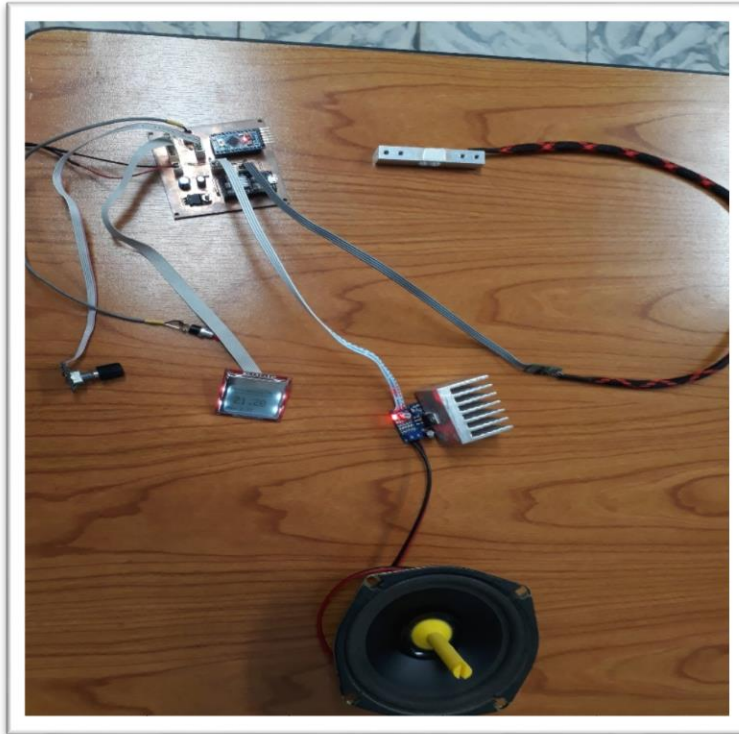


FIGURA 25 CIRCUITO ELECTRÓNICO COMPLETO. [PROPIA]

En el montaje del circuito se tiene en cuenta dos partes una de ellas es el generador mecánico unido al amplificador de señal, mientras que en la segunda parte se tiene el PCB con todos los elementos del generador de señales.

4.2 PROGRAMACION DEL PROTOTIPO

4.2.1 SOFTWARE

Teniendo en cuenta que se emplearán técnicas sobre creación de tecnología, debemos tener los conocimientos básicos sobre lo que se necesita para esto, uno de los módulos del prototipo es el **desarrollo de software**. Cuando hablamos de software, nos estamos refiriendo a la parte lógica e intangible de un sistema informático, donde se generan las entradas, procesamientos y salidas de los datos.

Se entiende como software a un programa o sistema que está conformado por componentes lógicos e instrucciones que tienen un fin en específico, dichos componentes se relacionan entre sí para llevar a cabo una función, un proceso o una petición hecha por el usuario.

Existe un estándar que debemos tener en cuenta a la hora de seleccionar, implementar y monitorear el ciclo de vida del software, es el estándar internacional ISO 12207.

Fue necesario la programación del generador de onda, debido a que este consta de dos microcontroladores, un Arduino Mini Pro el cual está encargado de adquirir los datos del encoder y el pulsador, mostrando las configuraciones en la LCD, está conectado de forma directa al segundo microcontrolador el cual es una placa Teency 3.2, esta placa es la que cumple la tarea de generar la señal senoidal de 1Hz a 150Hz con una resolución de 0.1hz aproximadamente, para enviar esta esta señal a través de su conversor DAC(conversor análogo digital) y reflejándose en una onda senoidal que varía en tención eléctrica, llegando esta señal a un amplificador de audio y se amplificada por un parlante, el cual cumple la tarea de hacer vibrar la cuerda.

A continuación, se presenta el esquema del generador de señales y parte del código que fue necesario implementar para el correcto funcionamiento del dispositivo de generación de ondas, que es el corazón del prototipo experimental.



FIGURA 26 ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DISEÑADO DE GENERADOR DE ONDA

En la figura 26, se observa el esquema de construcción del generador que fue necesario tener en cuenta para su posterior programación, el diseño del software se realizó en base a este esquema, teniendo en cuenta cada una de las etapas de la señal antes de ser entrega a la cuerda tensa.

Primera Etapa	Segunda Etapa
<pre> float tenc = 0; boolean up = false; boolean down = false; boolean middle = true; ClickEncoder *encoder; int16_t last, value; int nP = 0; int sal = 0; int C1 = 1; int C2 = 0; int C3 = 0; #define Hzout 4 int oP1 = 0; int nP1 = 0; </pre>	<pre> void setup() { Serial.begin(230400); display.begin(); display.clearDisplay(); setContrast(); encoder = new ClickEncoder(3, 2, A1); encoder->setAccelerationEnabled(false); Timer1.initialize(1000); Timer1.attachInterrupt(timerIsr); last = encoder->getValue(); pinMode(RP, INPUT_PULLUP); </pre>

FIGURA 27 PRIMER Y SEGUNDA ETAPA DEL SOFTWARE DE CONTROL DEL GENERADOR DE ONDAS

Con el fin de lograr la sincronización y el funcionamiento correcto de los elementos que componen el generador de ondas, se diseñó un software de control por etapas. Se observa en la figura 27 dos de las etapas presentes en el software, cabe resaltar que el prototipo diseñado cuenta con un manual de usuario donde aparece en detalle el contenido del software diseñado (anexo2), sus etapas y el código fuente instalado en los microcontroladores.

4.2.2 DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO

Se diseñó una interfaz de usuario a través de una pantalla Nokia 5110, con el fin de hacer amigable la interfaz de usuario al momento del usuario interactuar con la aplicación y que a la vez este se sienta cómodo y de fácil manejo.

La interfaz de usuario es la parte donde interactúa el usuario con la aplicación o equipo, allí es donde el usuario realiza las peticiones que desea pedir a la aplicación por medio de una pantalla que consta de menús, ventanas, botones, ratón, sonidos, entre otros. Por medio de estos elementos es como se genera el canal de comunicación entre usuario-maquina. Esta interfaz gráfica genera un ambiente cómodo, intuitivo y de fácil manejo para el usuario.

Dicha interfaz cuenta con un menú principal, como se muestra en la siguiente figura.



FIGURA 28 INTERFAZ DE USUARIO [PROPIA]

Como se observa en la figura 28, en el menú principal se podrá observar las diferentes opciones que se tienen para configurar los armónicos o diferentes frecuencias a las que se quiere llegar, saber que tensión hay en el momento en la cuerda tensa, como también se podrá configurar la luz y el contraste de la pantalla.

El funcionamiento del generador de onda senoidal del prototipo de cuerda tensa consta de una interfaz de usuario, la cual consta de un encoder rotativo y dos pulsadores estos dispositivos tiene la tarea de acceder a las múltiples funciones del generador, el dispositivo cuenta con una pantalla LCD en la cual se visualizan esas múltiples configuraciones del generador y también consta de una celda de carga para medir la tensión que se está aplicando en una cuerda.

Para desplazarnos en el menú principal giraremos el encoder hacia la izquierda para ir avanzando hacia las otras opciones del menú o giraremos hacia la derecha para regresar.

4.3 DESARROLLO MECANICO

Para el desarrollo mecánico se utilizó la impresora 3D Wanhao Duplicator I3 para hacer las piezas necesarias para el ensamble.

4.3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ESQUEMA MECÁNICO DEL PROTOTIPO.

Teniendo en cuenta que el equipo debe ser de fácil manejo y portátil, se diseñaron las piezas mecánicas en el software libre llamado DesignSpark Mechanical 2.0, que brinda al usuario la posibilidad de crear piezas a la medida utilizando formas geométricas, del mismo modo el software es compatible a la impresora 3D Wanhao en la cual se imprimieron los soportes y demás piezas del equipo.

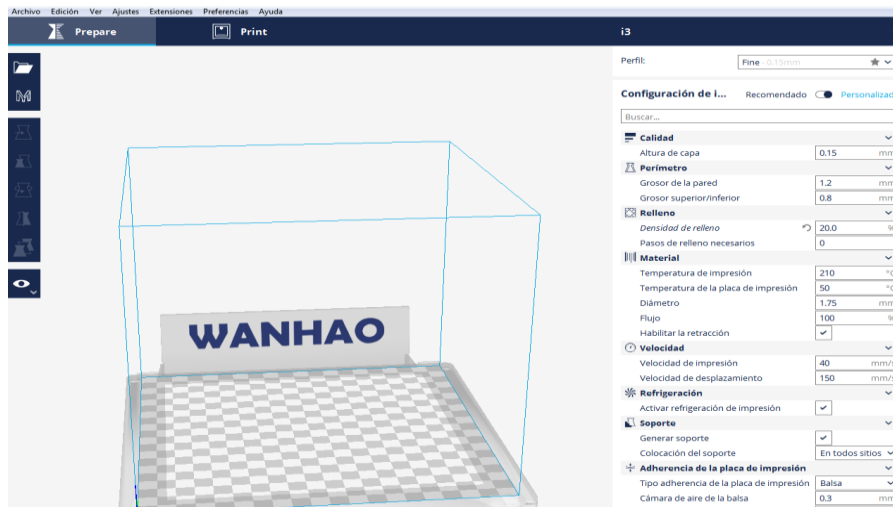


FIGURA 29 PROGRAMA DE LA IMPRESA 3D [PROPIA]

A continuación, se muestra el esquema de piezas realizado para el prototipo de oscilaciones en una cuerda tensa.

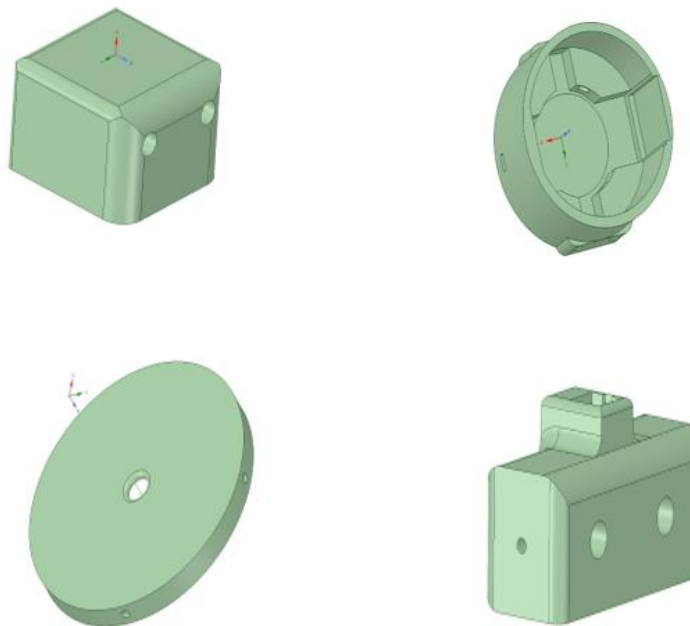


FIGURA 30 ESQUEMA DE PIEZAS SOFTWARE DESIGNSPARK MECHANICAL 2.0. [PROPIA]

4.3.2 DISEÑO DEL VÁSTAGO EN DONDE SE SUJETA LA CUERDA AL PARLANTE

Esta pieza se diseñó con el fin de sujetar la cuerda donde se podrá apreciar el fenómeno de vibraciones y la membrana del parlante que generará las oscilaciones

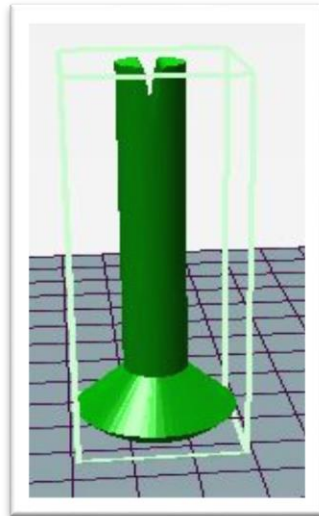


FIGURA 31 VÁSTAGO [PROPIA]

4.3.3 PARLANTE DE 15CM 20W 12V CON VÁSTAGO YA PEGADO

Este parlante cumplirá la con la tarea de generar un movimiento mecánico a la frecuencia que le asignemos para poder verlo reflejado en la cuerda tensa y apreciar los armónicos de este experimento



FIGURA 32 PARLANTE CON VÁSTAGO. [PROPIA]

4.3.4 CAJA PARA GENERADOR DE SEÑALES

Se realizó una pieza mecánica agradable que contuviera la parte electrónica del generador de señales donde el usuario puede interactuar con el equipo.

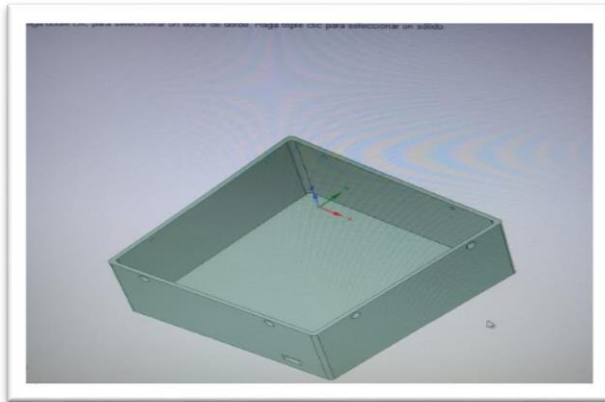


FIGURA 33 . DISEÑO CAJA PARA GENERADOR DE SEÑALES. [PROPIA]



FIGURA 34 CAJA PARA GENERADOR DE SEÑALES. [PROPIA]

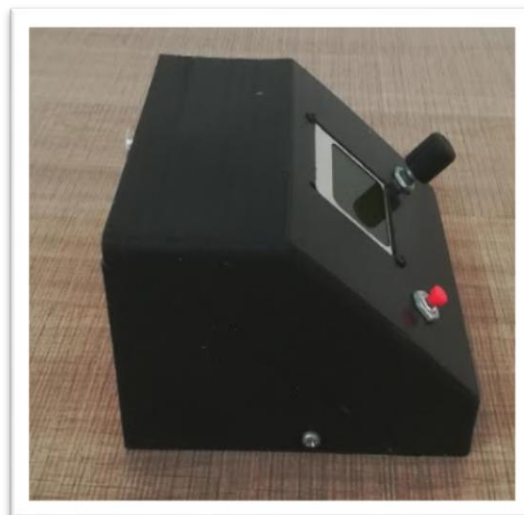


FIGURA 35 CAJA PARA GENERADOR DE SEÑALES ENSAMBLADA. [PROPIA]

4.3.5 SOPORTE BASE EQUIPO

Se diseñó y ensambló una pieza que serán el soporte de la base del equipo de cuerda tensa con dos agujeros a una altura determinada para darle estabilidad al equipo.

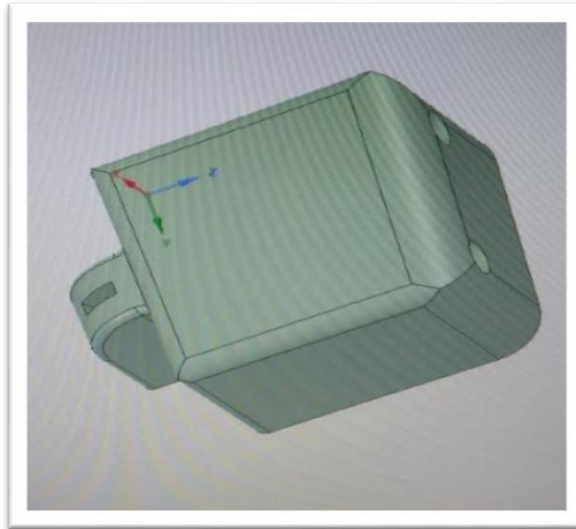


FIGURA 36 DISEÑO BASE EQUIPO. [PROPIA]

4.3.6 CAJA PARA EL PARLANTE Y AMPLIFICADOR DE SEÑAL.

Unos de los corazones del equipo es su generador mecánico el cual consta de un parlante y su amplificador de señal, para este generador se diseñó e imprimió un soporte que tuviera el espacio necesario para contener todos los elementos y de igual manera fuera soporte para la base del equipo.

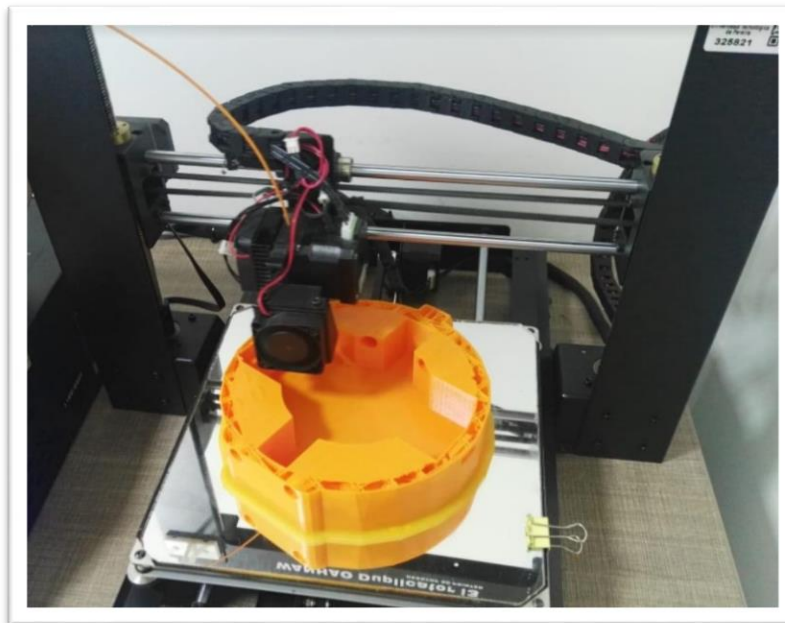


FIGURA 37 CAJA PARA EL PARLANTE Y AMPLIFICADOR DE SEÑAL EN ESTADO DE IMPRESIÓN. [PROPIA]

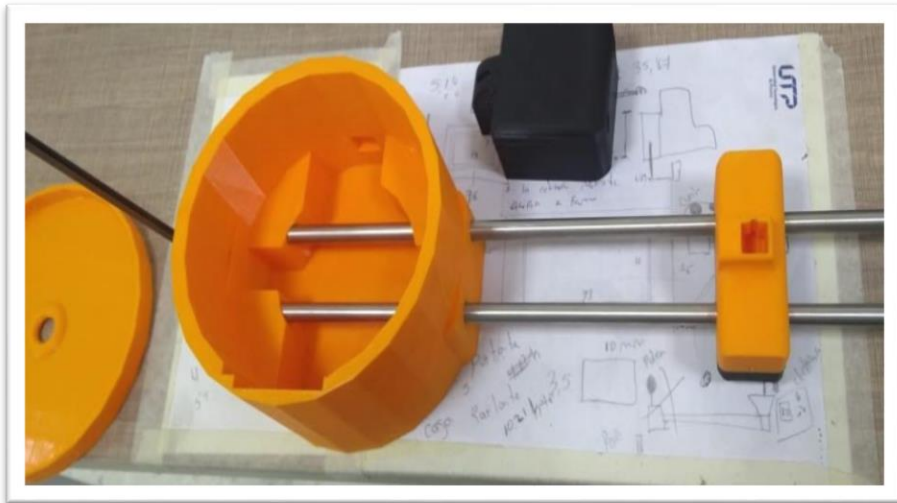


FIGURA 38 CAJA PARA EL PARLANTE Y AMPLIFICADOR DE SEÑAL EN ENSAMBLE. [PROPIA]

4.3.7 ENSAMBLE PARTE MECANICA.

Luego de tener todas las piezas impresas se agruparon los diferentes elementos del equipo y se ensamblaron el generador de señales, la pantalla, galga para la tensión, el amplificador de la señal, generador mecánico.

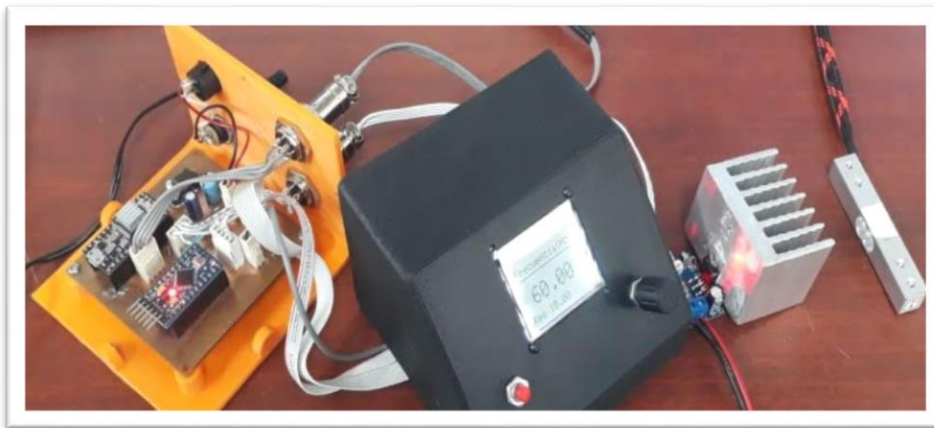


FIGURA 39 ENSAMBLE MECÁNICO. [PROPIA]

4.3.8 POLEA CON POCA FRICCIÓN.

Para generar la tensión de la cuerda se tuvo la necesidad de crear una polea con baja fricción, a la cual se le diseñaron dos piezas en la impresora 3D y luego se unieron con rodamientos a una varilla de acero, como se muestra a continuación.

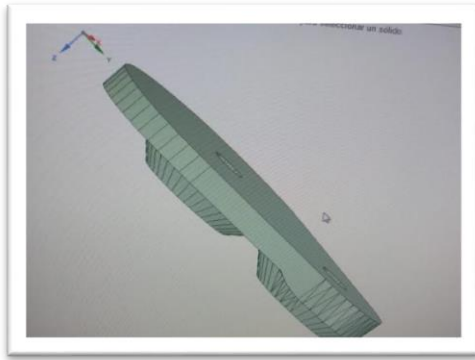


FIGURA 40 DISEÑO DE POLEA LATERAL. [PROPIA]

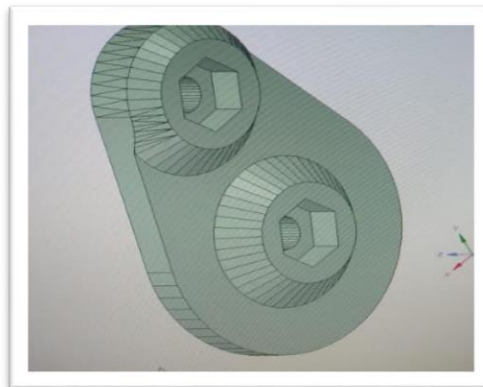


FIGURA 41 DISEÑO DE POLEA FRONTAL. [PROPIA]



FIGURA 42 POLEA IMPRESA. [PROPIA]

5 CAPITULO CINCO: RESULTADOS

Como resultado principal de este proyecto obtuvimos un prototipo autónomo para la experimentación de ondas estacionarias en una cuerda tensa, el cual está dividido en varias piezas que son de fácil manejo y portabilidad.

A continuación, se nombran las piezas del equipo y se da una breve descripción de cada una de ellas.

5.1 GENERADOR MECÁNICO DE ONDAS



FIGURA 43 GENERADOR MECÁNICO DE ONDAS ENSAMBLADO. [PROPIA]

Esta pieza fue construida con la finalidad de generar una onda mecánica por medio de la vibración, está compuesta por un bajo de 8 ohm y 20 W de potencia a su vez se encuentra conectado con un amplificador de señal que hace que el baffle incremente su amplitud de onda.

5.2 MASAS



FIGURA 44 MASAS. [PROPIA]

El prototipo cuenta con un juego de masa las cuales son las que brindan que a cuerda se encuentre tensionada.

5.3 POLEA



FIGURA 45 POLEA. [PROPIA]

La polea sirve como punto de apoyo de una cuerda la cual ejerce una fuerza

5.4 GENERADOR DE SEÑALES PARTE FRONTAL



FIGURA 46 GENERADOR DE SEÑALES PARTE FRONTAL. [PROPIA]

El generador de señales es un dispositivo electrónico, que genera o produce diferentes tipos de señales (sinusoidal, cuadrada) según las características propias de cada dispositivo, las cuales pueden servir en laboratorios de estudio de ondas, académicamente, o ya sea para probar o comparar con dispositivos electrónicos.

5.5 GENERADOR DE SEÑALES PARTE LATERAL

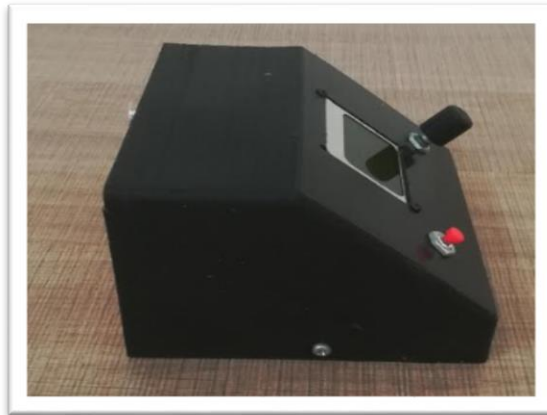


FIGURA 47 GENERADOR DE SEÑALES PARTE LATERAL. [PROPIA]

5.6 PARTE TRASERA DEL GENERADOR DE SEÑALES



FIGURA 48 PARTE TRASERA GENERADOR DE SEÑALES. [PROPIA]

El generador GS2018 posee en su parte trasera dos conectores , uno es para la entrada de la medida de tension que viene de la galga, la otra es la salida de la señal hacia el generador mecanico. De igual modo cuenta con un boton de encendido y apagado.

5.7 GALGA



FIGURA 49 GALGA. [PROPIA]

La galga es una unidad de longitud, la cual sirve para medir grosores muy pequeños o finos.

5.8 EQUIPO ENSAMBLADO

A continuación, se entrará en discusión acerca de los resultados obtenidos con el equipo para la práctica experimental de laboratorios de física, es importante resaltar que se realizaron varias pruebas de funcionamiento, donde se evidencio de forma clara los diferentes modos normales de vibración y se pudo identificar los cambios implícitos en la práctica a la hora de modificar las variables de longitud y tensión en el prototipo diseñado que se muestra en la figura 50.

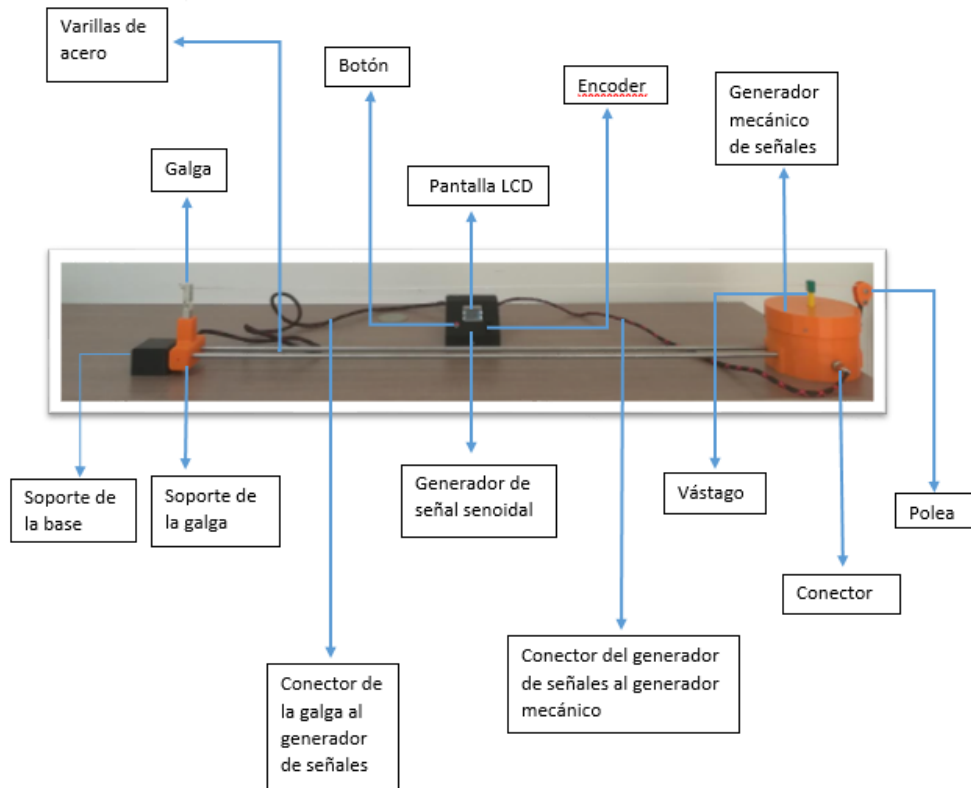


FIGURA 50 EQUIPO ENSAMBLADO. [PROPIA]

Es de gran importancia aclarar que, una vez terminadas las piezas del prototipo se integraron de forma que el usuario tenga un equipo de fácil uso y práctico para la experimentación de la práctica de cuerda tensa.

Cabe destacar que el prototipo fue desarrollado para realizar la práctica de ondas estacionarias de cuerda tensa, expuesto en el laboratorio de física 3 y a su vez analizar los resultados arrojados por el equipo para verificar su funcionamiento, compatibilidad, facilidad y confiabilidad de los resultados.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para la práctica una vez el equipo fue integrado y se realizará una comparación de los resultados del equipo con los de las prácticas ya existentes.

5.9 RESULTADOS DE LA PRÁCTICA ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA TENSA.

Como resultado final de la práctica experimental de la cuerda tensa, se integraron todas las piezas formando el equipo de la figura 50.

En la práctica se pretende encontrar la densidad de una cuerda mediante la relación de frecuencias propias de oscilación con el número de armónicos, la raíz cuadrada de la tensión y con el inverso de la longitud, cuando los parámetros no permanecían constantes.

Con las condiciones iniciales donde la longitud de la cuerda L sería la máxima permitida (1.26 m) y una tensión de (2.09 N), luego de esto, los estudiantes tuvieron que encender el generador de señales e incrementar poco a poco la frecuencia hasta encontrar el modo fundamental de resonancia y sus armónicos para generar la tabla 1.

# Armónicos	Frecuencia (Hz)
1	10,1
2	20.1
3	29.1
4	35.1
5	48.1

Tabla 1. Frecuencias de armónicos con $L = 1.26$ y $T = 2.09$ N

Teniendo en cuenta esta información se generó el análisis correspondiente que certifique la toma de datos y el buen funcionamiento del equipo. Para ello se construye una gráfica de Frecuencia en función del número de armónicos la cual se muestra en la Figura 51.

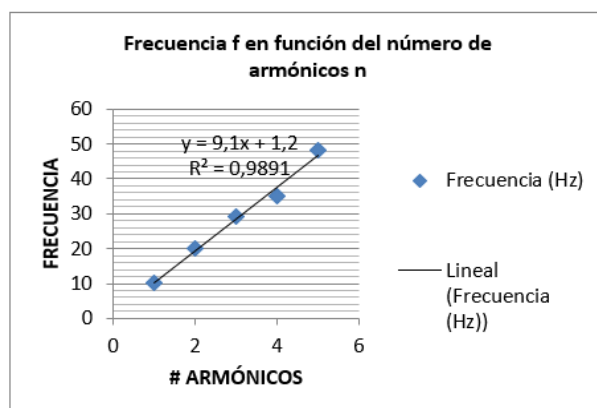


FIGURA 51 FRECUENCIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ARMÓNICOS[PROPIO]

Posteriormente el estudiante refleja el resultado arrojado por la gráfica y da una respuesta de ella donde la gráfica obtenida anteriormente es una línea recta, y la frecuencia varía de acuerdo a la ecuación:

$$f = 9,1X + 1,2$$

Por otra parte, la expresión teórica que relaciona la frecuencia de las oscilaciones en una cuerda tensa, en función de las variables que afectan dicho comportamiento, está dada por:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Donde:

n : Es el número de armónico

L : Es la longitud de la cuerda

T : Es la tensión en la cuerda

μ : Es la densidad de la cuerda

Posteriormente, si se tiene la ecuación de la recta y la expresión teórica de la frecuencia en función de las variables, se realiza un análisis correspondiente para obtener el valor de la densidad de masa μ (Valor experimental) con su correspondiente incertidumbre. [15]

$$f_n = n \left(\frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \right) + 1,2$$

$$9,1 = n \left(\frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \right) + 1,2$$

Con $n = 1$

$$\left(\frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \right) = 9,22$$

$$\sqrt{\frac{T}{\mu}} = 2L(9,22)$$

$$\frac{T}{\mu} = [2L(9,22)]^2$$

$$\mu = \frac{T}{4L^2(9,22)^2}$$

Con $T = 2,09 \text{ N}$ y $L = 1,26 \text{ m}$

$$\mu = \frac{2,09}{(4)(1,26)^2(9,22)^2}$$

$$\mu = 3,87 * 10^{-3} \text{ kg/m}$$

$$U_b = \frac{0,001 \text{ m}}{\sqrt{3}} = 5,77 * 10^{-4}$$

$$U_E = k * U_b$$

Con $k = 1,96$

$$U_E = 1,96 * 5,77 * 10^{-4}$$

$$U_E = 1,13 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 1,26 \text{ m} \pm 1,13 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial L} = \frac{2T \Delta l}{4L^3(10,1)^2}$$

Con $T = 2,09$ y $\Delta l = 1,13 * 10^{-3} \text{ m}$

$$\Delta\mu = 5,78 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\mu = 3,87 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}} \pm 5,78 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Luego se procedió a determinar el dato teórico de la densidad de la cuerda calculada a partir de su masa y longitud, mediante la expresión $\mu = m/L$, donde m es la masa de la cuerda y L es la longitud total de la cuerda, el cual fue de $3.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$. La masa se midió con una incertidumbre de $\pm 0,001 \text{ g}$. y la longitud con $\pm 0,1 \text{ cm}$.

Con estos datos se calcula la incertidumbre de la densidad de la masa de la siguiente forma.

$$\Delta\mu = \mu \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta l}{l} \right)$$

$$\Delta\mu = \left(3.7 * 10^{-3} \frac{Kg}{m} \right) \left(\frac{0,0000001 Kg}{0,0098126 Kg} + \frac{0,001 m}{2,63 m} \right)$$

$$\Delta\mu = 0,002 * 10^{-3} \frac{Kg}{m}$$

$\mu = 3,7 * 10^{-3} \frac{kg}{m} \pm 1,79 * 10^{-6} \frac{kg}{m}$
--

Dónde: $\Delta\mu$ es la incertidumbre de la densidad

$\mu = 3.7 * 10^{-3} \frac{Kg}{m}$ es la densidad de la cuerda

$\Delta m = 0,0000001 Kg$ es la incertidumbre de la masa

$m = 0,0098126 Kg$ es la masa

$\Delta l = 0,001 m$ es la incertidumbre de la longitud de la cuerda

$l = 2,63 m$ es la longitud de la cuerda.

Si se considera este valor como teórico y se compara en términos de porcentaje al valor de μ obtenido en el parte experimental tenemos [17].

$$E_{\%} = \frac{V_{teo} - V_{exp}}{V_{teo}} * 100$$

$$E_{\%} = \frac{3,7 * 10^{-3} - 3,87 * 10^{-3}}{3,7 * 10^{-3}} * 100$$

$$E_{\%} = 4,6 \%$$

Seguido el procedimiento de toma de datos, los estudiantes cambiaron condiciones en las variables a medir. Para la segunda parte se conserva la longitud $L = 1.26 m$ y se varia la tensión, para luego variar la frecuencia del generador hasta encontrar el segundo armónico Ver figura 51. Dicha frecuencia es registrada en la tabla 2. Cada vez que se cambia la tensión se repite el procedimiento para encontrar el armónico deseado y registrar los resultados.

Tensión(N)	Frecuencia(Hz)
1.4	7.1
1.8	9.1
2.25	10.1
2.63	11.1
2.83	12.1

Tabla 2. Registro de los datos suministrados para el cambio de tensión.

Con los datos arrojados por el equipo, los estudiantes toman los datos que se encuentran registrados en la tabla 2, para construir la gráfica de la figura 52 de frecuencia en función de la raíz cuadrada de la tensión.

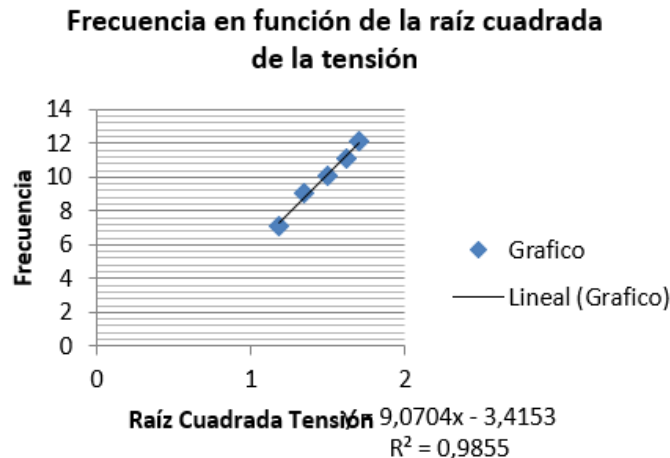


FIGURA 52 FRECUENCIA EN FUNCIÓN DE LA RAÍZ CUADRADA DE LA TENSIÓN.[PROPIA]

Posteriormente, el estudiante refleja el resultado arrojado por la gráfica y da una respuesta de ella donde la gráfica obtenida anteriormente es una línea recta. A partir de este gráfico se obtuvo la ecuación que relaciona la frecuencia con la tensión un nuevo valor para μ con su respectiva incertidumbre. Para luego compararlo con su dato teórico.

La ecuación que relaciona la frecuencia con la tensión es:

$$f = 9,0704\sqrt{T} + 3,4153$$

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\mu = \left(\frac{nT}{2L(f)} \right)^2$$

Donde $n = 1$, $f = 7,1$, $L = 1,26$ m y $T = 1,18$

$$\mu = \left(\frac{1 * 1,18}{2(1,26)(7,1)} \right)^2$$

$$\mu = 4,35 * 10^{-3} \frac{kg}{m}$$

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial L} = \frac{2\Delta L}{(f^2) * L^3};$$

Con $\Delta L = 0,001$, $f = 7,1$ Hz y $L = 1,26$ m

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial L} = \frac{2 * 0,001}{(7,1^2) * (1,26^3)}$$

$$\Delta\mu = 9,92 * 10^{-6} \frac{kg}{m}$$

$$\mu = 4,35 * 10^{-3} \frac{kg}{m} \pm 9,92 * 10^{-6} \frac{kg}{m}$$

Ahora el porcentaje de error será:

$$E_{\%} = \frac{V_{teo} - V_{exp}}{V_{teo}} * 100$$

$$E_{\%} = \frac{3,7 * 10^{-3} - 4,35 * 10^{-3}}{3,7 * 10^{-3}} * 100$$

$$E_{\%} = 17,6 \%$$

Teniendo en cuenta los procedimientos realizados por los estudiantes se comprueba que al variar la tensión el porcentaje de error aumenta, pero se considera un valor considerablemente apropiado ya que se puede tener algún tipo de error en la toma de uno de los datos, sin embargo, aún si se presenta este crecimiento los datos son más cercanos y confiables que los datos arrojados por los equipos y practicas realizadas con los materiales existentes en el laboratorio.

Como último cambio en la experimentación los estudiantes dejan fija la tensión y varían la longitud de la cuerda como se muestra en la figura 53 con el fin de encontrar las frecuencias del segundo armónico para cada variación y regístralos en la tabla 3.

Con los datos suministrados con el equipo, se registran para luego entrar en el estudio y análisis de los resultados.

Longitud (cm)	Frecuencia (Hz)
110	13,1
100	15,1
90	16,1
80	19,1
120	12,1

Tabla 3. Datos de cambio de longitud y sus respectivas frecuencias.

Con los datos suministrados por el equipo se realizala la gráfica de la figura 53 la cual muestra el comportamiento de la frecuencia al variar la longitud.

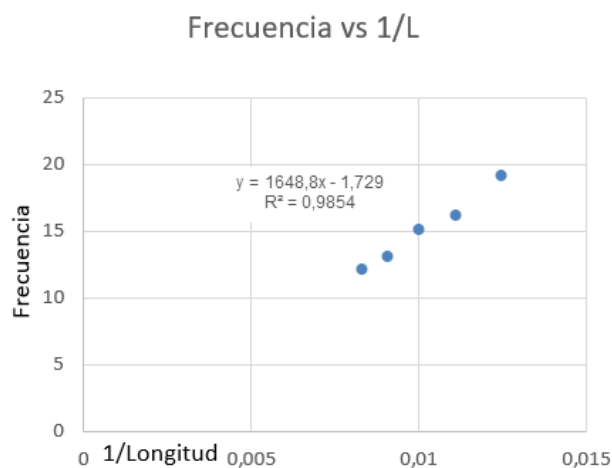


FIGURA 53 FRECUENCIA EN FUNCIÓN DEL INVERSO DE LA LONGITUD[PROPIA]

Posteriormente el estudiante refleja el resultado arrojado por la gráfica y da una respuesta de ella donde la gráfica obtenida anteriormente es una línea recta. A partir de este gráfico se obtuvo la ecuación que relaciona la frecuencia en función del inverso de la longitud donde

$$f = 1648,8 \frac{1}{L} - 1.1729$$

En base a los resultados obtenidos el error de la densidad de la masa crece a medida que la longitud varia para este caso el porcentaje de error es muy alto y es un dato que se tiene que tomar de nuevo siguiendo con rigurosidad los pasos de la guía.

Teniendo en cuenta el proceso realizado para el cálculo de la densidad de la masa, se da una comparación con datos arrojados por los equipos existentes en el laboratorio de física 3.

Como primera comparación se muestra las tablas de cada equipo figura 51 Donde los estudiantes sin variar la longitud y tensión varían la frecuencia para encontrar los modos fundamentales.

Armónico (n)	Frecuencia (fn) [Hz]
1	9,0
2	17,8
3	25,0
4	35,0
5	45,0

Tabla equipos de laboratorio

# Armónicos	Frecuencia (Hz)
1	10,1
2	20.1
3	29.1
4	35.1
5	48.1

Tabla Equipo Dicoped

FIGURA 54 COMPARACIÓN TABLAS DE DATOS CON LONGITUD Y TENSIÓN CONSTANTE[PROPIA].

Se observa en la figura 54 que en ambas tablas los equipos muestran un comportamiento ascendente en sus datos de frecuencia y conservando la teoría que luego de tener el primer modo fundamental, los armónicos siguientes se encontraran cerca de las frecuencias múltiplos de la primera.

Seguido de esta comparación se mostrarán las gráficas obtenidas de cada una de las tablas como se muestra en la figura 55

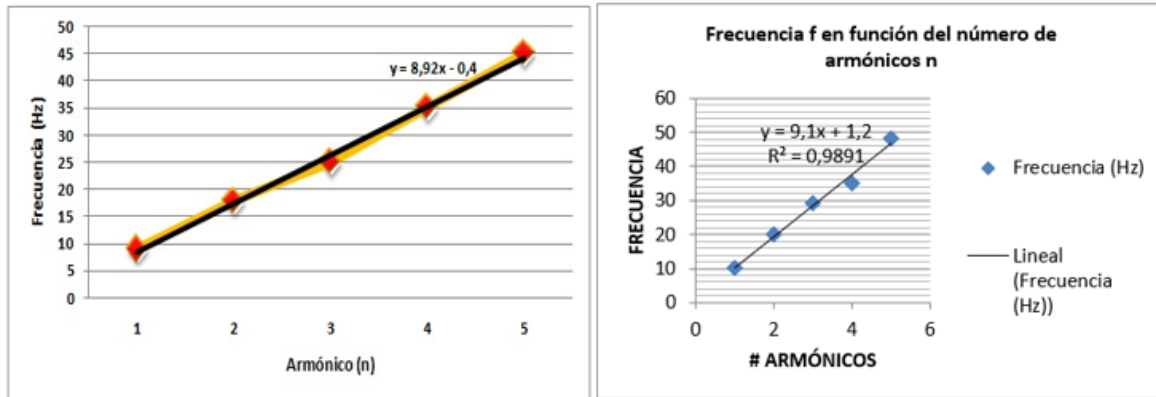


FIGURA 55 COMPARACIÓN DE GRAFICAS DE LOS EQUIPOS DE LABORATORIO CON EL EQUIPO DE DICOPED[PROPIA].

Como resultado de la comparación de las gráficas se puede evidenciar que, en ambos casos, se obtiene una recta con su respectiva ecuación.

Teniendo en cuenta el proceso del cálculo de la densidad de masa y su respectiva incertidumbre, se muestra la comparación de los resultados arrojados para cada experimentación.

En la figura 56 se muestran las ecuaciones y sus respectivas densidades.

Función	
$f_2 = 8,92(n) - 0,4$	$f = 9,1X + 1,2$
Densidad	
$\mu = 2,50 \times 10^{-3} \pm 2,14 \times 10^{-6} \left[\frac{kg}{m} \right]$	$\mu = 3,87 * 10^{-3} \frac{kg}{m} \pm 5,78 * 10^{-6} \frac{kg}{m}$
Error	
$E_{\%} = 32 \%$	$E_{\%} = 4,6 \%$
Resultados Equipos de Laboratorio	Resultados Equipo Dicoped

FIGURA 56 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS EQUIPOS BAJO PRUEBA[PROPIA].

En base a los resultados comparados se puede evidenciar que el equipo diseñado presenta un mejor desempeño que los equipos de laboratorio, ya que el error presentado por el equipo diseñado es menor que el presentado por los equipos de laboratorio.

Posteriormente se realizaron los cálculos y análisis de la densidad de masa μ para dos variaciones más (longitud, tensión) donde los errores en la densidad de masa para ambos

equipos incrementan. Sin embargo, los cálculos evidencian las mismas diferencias donde el equipo diseñado siempre presenta un menor error en sus resultados.

5.10 COMPARACIÓN LABORATORIO DE METROLOGÍA DE VARIABLES ELÉCTRICAS.

Como segundo resultado importante del proyecto, se tiene la calibración del generador de señales en el laboratorio de metrología en variables eléctricas. Donde se buscó la confiabilidad del generador de señales Gs 2018 el cual fue comparado con el osciloscopio Digital Fluke 123 en el modo medición.

Este proceso se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de metrología bajo condiciones óptimas y reglamentarias, en este procedimiento se tuvieron en cuenta condiciones como la temperatura y la humedad.

Seguidamente, el generador fue comparado en el modo generación de frecuencia en el rango de 1 a 150 Hz manejado las tres escalas permitidas por el equipo, (0,1Hz, 1Hz y 10 Hz). El osciloscopio Digital Fluke 123 se colocó en modo medición donde mostro en pantalla la frecuencia emitida por el generador con el fin de demostrar que el generador GS 2018 registra en pantalla una medida confiable.

Se debe tener en cuenta que, en el proceso de calibración, el equipo se encontró siempre en condiciones óptimas, donde el tiempo que duro dicha operación fue de 2 horas.

El proceso de calibración radica en dividir el rango en 5 partes, (1Hz, 50 Hz, 75 Hz, 105 Hz, 150 Hz). Para luego generar la frecuencia en cada una de sus escalas permitidas por el generador, colocando la escala de 0,1 Hz se tomó 10 datos de cada una de las divisiones del rango, luego en la escala de 1 Hz se repite el procedimiento para cada valor y por último se realiza el proceso con la escala de 10 Hz.

Luego de tener los 10 datos por cada frecuencia (1Hz, 50 Hz, 75 Hz, 105 Hz, 150 Hz) se registra en una tabla de medición que solo posee el laboratorio de metrología, para luego estudiar y analizar los resultados.

Para dar una mejor claridad del proceso realizado se muestra en las figuras 55, 56 y 57 el reporte entregado por el laboratorio de metrología en variables eléctricas.

MÉTODO DE CALIBRACIÓN:

Norma Técnica EURAMET cg-15 Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters (Versión 3).

CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $(23,67 \pm 0,36) ^\circ\text{C}$

Humedad Relativa: $(44,0 \pm 1,7) \%\text{HR}$

EQUIPO UTILIZADO E INFORMACIÓN DE TRAZABILIDAD:

Equipo: Osciloscopio Digital FLUKE 123

No. de serie: DM9960291

Certificado No: CCEE-368-2018

El Laboratorio establece la trazabilidad de las mediciones del patrón de referencia "Osciloscopio Digital FLUKE 123" con el Sistema Internacional de Unidades (SI) por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones que los vincula a los patrones primarios pertinentes a las unidades de medición del SI.

CONFIGURACIÓN Y OPERACIONES FUNCIONALES DEL EQUIPO BAJO PRUEBA:

El tiempo de estabilización del equipo bajo prueba con las condiciones ambientales controladas fue de 2 horas antes de iniciar el proceso de calibración y dentro de este tiempo se mantuvo encendido por un periodo de 30 minutos.

FIGURA 57 PRIMERA PARTE DEL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN[PROPIA]

OBSERVACIONES:

- Los puntos de calibración fueron seleccionados de acuerdo a la Solicitud del Cliente.
- El equipo bajo prueba se calibró con sus propios accesorios.
- La incertidumbre expandida es una combinación de componentes de distribución rectangular y componentes de distribución normal.

LABORATORIO DE METROLOGÍA
VARIABLES ELÉCTRICAS
Carrera 27 No. 10 - 02 – Pereira
Teléfono: 3216134
Certificado No. **CCEE-376-2018**

Código	123-LME-F02
Versión	8
Fecha	2018-09-28
Página	3 de 3

- La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura k.
- Los valores de k se calculan para un nivel de confianza del 95%; si la incertidumbre dominante tiene una distribución rectangular, este factor es de 1,65.

FIGURA 58 SEGUNDA PARTE DEL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN[PROPIA]

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

MODO GENERACIÓN

Calibración de la función: Frecuencia					
Intervalo de Indicación	Lectura Promedio Equipo	Lectura Patrón	Error	k	Incertidumbre Expandida
1 Hz a 150 Hz Resolución de 0,10 Hz	1,000 Hz	1,041 Hz	- 0,041 Hz	1,65	± 0,14 Hz
	50,00 Hz	50,04 Hz	- 0,04 Hz	2,01	± 0,29 Hz
	75,00 Hz	74,92 Hz	0,08 Hz	1,96	± 0,38 Hz
	105,0 Hz	104,9 Hz	0,1 Hz	1,96	± 0,51 Hz
	150,0 Hz	150,2 Hz	- 0,2 Hz	1,65	± 0,60 Hz
1 Hz a 150 Hz Resolución de 1,00 Hz	1,000 Hz	1,039 Hz	- 0,039 Hz	1,65	± 0,14 Hz
	50,00 Hz	50,05 Hz	- 0,05 Hz	2,01	± 0,29 Hz
	75,00 Hz	74,91 Hz	0,09 Hz	1,96	± 0,38 Hz
	105,0 Hz	104,9 Hz	0,1 Hz	1,96	± 0,51 Hz
	150,0 Hz	150,2 Hz	- 0,2 Hz	1,65	± 0,60 Hz
1 Hz a 150 Hz Resolución de 10,00 Hz	1,000 Hz	1,041 Hz	- 0,041 Hz	1,65	± 0,14 Hz
	51,00 Hz	50,97 Hz	0,03 Hz	2,01	± 0,30 Hz
	81,00 Hz	80,99 Hz	0,01 Hz	1,96	± 0,41 Hz
	101,0 Hz	101,1 Hz	- 0,1 Hz	1,96	± 0,49 Hz
	150,0 Hz	150,2 Hz	- 0,2 Hz	1,65	± 0,60 Hz

FINAL DE DATOS

FIGURA 59 TERCERA PARTE DEL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN[PROPIA]

Por otra parte, se realizó la implementación de un segundo generador de frecuencia para mostrar el estudio de las ondas utilizando dos generadores diferentes. se trata de un estroboscopio el cual también fue diseñado y construido como una mejora del equipo para visualizar de una manera más clara las frecuencias de resonancia.

En la figura 60 se muestra la implementación del estroboscopio en la experimentación de cuerda tensa.



FIGURA 60 EFECTO DEL ESTROBOSCOPIO SOBRE LA CUERDA TENSA VIBRANDO[PROPIO].

Se observa en la figura 60, que el efecto del estroboscopio sobre el prototipo funcional, permite una mejor visualización del fenómeno ondulatorio presente sobre la cuerda tensa.

Este equipo se implementó de manera adicional al sistema de cuerda tensa, para que facilitara a los estudiantes y docentes la visualización de los modos normales generados en sobre la cuerda según cada frecuencia.

De este modo, los estudiantes en el procedimiento de la experimentación de la cuerda tensa usaron un estroboscopio que al dejar un armónico en la cuerda (1, 2, 3, 4) encienden el generador y observan que sucede con la cuerda en el momento en que aumentan la frecuencia del estroboscopio para luego explicar con sus palabras y analizar lo observado en el experimento.



FIGURA 61 ESTROBOSCOPIO DISEÑADO E IMPLEMENTADO [PROPIO]

Como se observa en la figura 61, se observa el estroboscopio desde dos ángulos distintos, en la imagen superior se observa la parte frontal por donde genera la ráfaga de luz, y en la imagen inferior se observa los controles de calibración de frecuencia del equipo.

6 CAPITULO SEIS: CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un prototipo funcional para la práctica experimental de las ondas estacionarias en una cuerda tensa.

Se diseñó e implementó una guía de laboratorio para la materia “Laboratorio de física III”, (anexo 3), donde utiliza el equipo implementado para la realización de la práctica.

Se diseñó e implementó un software capaz de manejar el equipo, el cual permite modificar las variables de frecuencia desde una pantalla de control fácil de manejar, con la que, estudiantes y docentes, pueden realizar cambios a la onda generada en la cuerda tensa.

Se diseñaron e implementaron los sistemas electrónicos y mecánicos necesarios para el funcionamiento del equipo bajo las condiciones normales de un laboratorio de física de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Se diseñó un manual de funcionamiento del equipo y el software (anexo 2), donde se recopila la información de cada una de las piezas, forma de instalación, puesta en marcha del equipo, manejo de la interfaz de usuario y características técnicas del equipo.

Se realizó una calibración certificada del equipo, realizada por el Laboratorio de Metrología de la Universidad Tecnológica de Pereira (anexo 1), que permite garantizar la calidad de las medidas tomadas por el equipo y la eficiencia de los elementos utilizados en el mismo.

Se generó trazabilidad del equipo realizado lo cual le da un aporte de confiabilidad al generador creado que, a su vez, da soporte a la ley física demostrada.

Se puede evidenciar que el equipo diseñado muestra un mejor comportamiento en los datos y una mayor confiabilidad gracias a que su error es **menor** y la exactitud con la que se encuentran las frecuencias es **mayor** que la manejada con los equipos existentes en el laboratorio.

Por último, se concluye que, al realizar una comparación de los datos obtenidos por los estudiantes en la realización de la práctica experimental, y su respectivo análisis de resultados, con el prototipo diseñado y los equipos existentes en el laboratorio de física, siempre se obtuvo un resultado más exacto respecto a la literatura, con el prototipo gracias a la mayor resolución presente en este, su capacidad de variar la frecuencia y otros parámetros con precisión por medio del software y la facilidad con la que realiza la toma de datos.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Gómez y R. Weltri, “Sobre los cuasi-nodos en las oscilaciones de cuerdas reales”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 139 - 144, (2004)
- [2] A. Roatta y R. Weltri, “Efecto Doppler para pulsos y su representación en el plano (x, t)”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 1304 (2009)
- [3] R. Alvarado et al, “Modos de oscilación en cuerdas con densidad constante por mitades: análisis y demostración experimental”, *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA* 47 (5) 493-499, octubre 2001.
- [4] B.J. Gómez et al, “Efectos de la inserción de elementos de parámetros concentrados sobre los modos normales de oscilación de un medio finito continuo”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, 3311 (2008).
- [5] Grupo de Investigación DICOPED, “Equipo Experimental Ley de Snell”, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [6] R. Serway, J. Jewett, Serway Física para Ciencias e Ingenierías Volumen 1, Ed. 7, México: Cengage Learning Editor, 2008.
- [7] R. Serway. “Física I”, Editorial MacGraw Hill. Cuarta edición. 2005.
- [8] M. Alonso y E. J. Finn, “Física Volumen II: Ondas y Campos”, Ed. 1, Fondo Educativo Interamericano, 1970.
- [9] Y. Hugh, R. Freedman, “Física Universitaria Sears-Zemansky Volumen 1”, Pearson Educación de México (Addison-Wasly), 12va Edición Vol1, México, 2009.
- [10] H. Arcos et al, Guías de Física Experimental III, Universidad Tecnológica de Pereira, revisado en octubre de 2018, recuperado online en: <http://media.utp.edu.co/facultad-ciencias-basicas/archivos/contenidos-departamento-de-fisica/guiaslabiiiingenierias2012.pdf>.
- [11] E. Arenas, “Física Entretenida – Ondas estacionarias” [Online], revisado online en noviembre de 2018, recuperado online en <https://www.youtube.com/watch?v=dsLtOwq3xm8>.
- [12] TecnoEdu, “Impulsor de ondas mecánicas Pasco - SF-9324” [Online], revisado en noviembre de 2018, recuperado online en: <https://tecnoedu.com/Pasco/SF9324.php>.
- [13] Pasco, Economy Wave Driver [Online], Revisado en noviembre de 2018, recuperado online en: https://www.google.com.co/search?q=2.%09Economy+Wave+Driver&rlz=1C1CHBD_esC_O782CO782&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=boDVtaxwFy8BaM%253A%252CO2xguxtJgNnBRM%252C_&usq=AI4_-kRvxGvWXqv6TikdcIL0sst6dxCyA&sa=X&ved=2ahUKEwiBkPnjhOneAhWBmIkKHekqCeKQ9QEwBnoECAQQCg

[14] TecnoEdu, "Excitador de ondas mecánicas para experimentar vibraciones resonantes en cuerdas Pasco - WA-9857^a" [Online], revisado en noviembre de 2018, recuperado online en: <https://tecnoedu.com/Pasco/WA9857A.php>.

[15] L. E. Llamosa, "Diseño de un procedimiento para el cálculo de incertidumbre en mediciones indirectas". *Revista Scientia et technica*, Pereira, 2010

[16] Arduino, "Arduino mini Pro 328" [Online], revisado en noviembre 2018, recuperado online en <https://arduino.cl/arduino-pro-mini-328/>

[17] Física Lab, "Errores Absolutos y Relativos" [Online], revisado en noviembre de 2018, recuperado online en: <https://www.fisicalab.com/apartado/errores-absolutos-relativos#contenidos>